

Research on Method for Phase Accuracy Measurement Traceability of Digital Test Equipment

Ming Lei, Yue Guo, Yingchun Wang, Lieqi Yan, Xin Zheng

Metrology Centre of Hubei Electric Power Company, Wuhan Hubei
Email: hbeptriuf@126.com

Received: Oct. 18th, 2016; accepted: Nov. 12th, 2016; published: Nov. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Electronic instrument transformers (EIT) and merging units (MU) are widely utilized in the smart substations, and EIT testers and MU testers are used to test the accuracy of EITs and MUs. The EIT tester calibrator can calibrate the accuracy of the equipment. However, the accuracy of calibrator, especially the phase accuracy, cannot be traced to the existing standards due to the lack of appropriate method, thus causing the incompleteness of the accuracy tracing system. Therefore, the EITs and MUs running in the smart substations cannot be used as electric power measurement equipment. In order to solve this problem, a method to calibrate the phase accuracy of the digital equipment is proposed in this paper. Compared to the currently used method based on digital micro-difference source, this method can trace the phase accuracy of EITs and MUs to a precise time standard. This method provides the technical basis for the smart equipment's utilization as metrological devices.

Keywords

Phase Accuracy, Electronic Instrument Transformer, Merging Unit, Measurement Traceability, Zero Cross

数字式检测装置相位误差量值溯源方法研究

雷 鸣, 郭 玥, 汪应春, 鄢烈奇, 郑 欣

国网湖北省电力公司计量中心, 湖北 武汉

Email: hbeptryf@126.com

收稿日期: 2016年10月18日; 录用日期: 2016年11月12日; 发布日期: 2016年11月15日

摘要

当前智能变电站中大量使用电子式互感器与合并单元等智能设备,用于检测这些智能设备的主要有电子式互感器校验仪以及合并单元测试仪等。这些设备的准确度特性可使用电子式互感器校验仪整体检测装置对其进行检测,但该检测装置的准确度,特别是相位准确度尚无有效的方法溯源到现有的标准量值,导致现场运行的智能二次设备的量值溯源体系不完整,无法应用于电量的贸易结算。针对此情况,本文提出了一种用于校准数字式检测装置相位准确度的方法,该方法与现有基于数字微差源的方法相比,具有简便可行并可溯源的特点。该方法可将智能设备的相位准确度最终溯源到时间标准,完善了量值溯源体系,为智能设备科学准确的用于电能贸易结算提供技术依据值。

关键词

相位准确度, 电子式互感器, 合并单元, 量值溯源, 过零

1. 引言

近年来,随着我国智能电网建设工作的逐步推进,大量新一代智能变电站或智能化改造变电站投产运行[1]。在这些智能变电站中,作为“电力传感器”的互感器主要有电子式互感器方式和传统互感器配合模拟量输入合并单元的方式两种。在当前技术条件下,电子式互感器的准确度检测系统由传统标准互感器和电子式互感器校验仪构成,而合并单元的准确度可使用合并单元测试仪检测。电子式互感器校验仪和合并单元测试仪均使用基于模拟/数字微差源原理的电子式互感器校验仪整体检测装置(以下简称整检装置)来校准[2] [3]。然而当前,由于对整检装置的校准只能采用比对的方式进行,无法使整体检测装置的准确度,特别是相位准确度,溯源到现有的标准,导致电子式互感器和合并单元的量值传递体系不完善,无法作为电能计量器具使用[4]。为了解决此问题,本文提出了一种基于脉冲偏移原理的检测方法,可对电子式互感器校验仪及合并单元测试仪进行检测。基于该方法的整检装置的相位准确度可使用时间标准来校准,从而完善了电子式互感器及合并单元的相位准确度量值溯源体系,为其合法有效的用作电能计量器具提供技术依据。

2. 整检装置基本工作原理

用整检装置校准电子式互感器校验仪及合并单元测试仪的工作原理如图1所示。整检装置向被测校验仪输出模拟电压或电流信号的同时,也同步输出相应的数字信号以及脉冲同步信号到校验仪的相应接口,其中,数字信号被编码成 IEC61850 格式,而脉冲同步信号通常为 IRIG-B 模式或秒脉冲(PPS)格式[5]。检测过程中,整检装置将模拟信号与数字信号之间预先设定一个综合误差(包括比值差和相位差)然后将校验仪测得的结果与预设值进行比较,从而实现对于电子式互感器校验仪与合并单元测试仪的校准。区别在于,电子式互感器校验仪通常是单通道,而合并单元测试仪为多通道。

在传统互感器检测领域,上述比值差和相位差是用模拟微差源方法来实现的[6] [7],当前整检装置的工作原理大都借鉴上述方法,采用模拟微差源或数字微差源的方式。但由于整检装置的综合误差是模拟信号与数字信号之间的比值差与相位差的合成,而模拟信号与数字信号之间无法直接比较,因此,无法

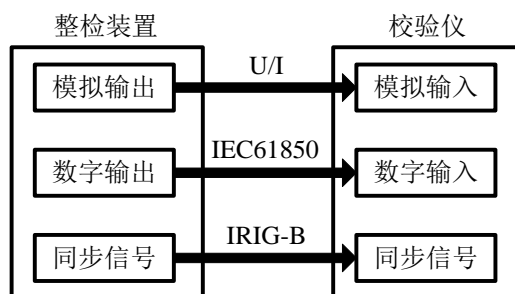


Figure 1. Calibration diagram of EIT/MU tester
图 1. 电子式互感器/合并单元测试仪校准原理

使用更高准确度等级的设备对数字信号与模拟信号之间的“微差”进行校准。换言之，微差源法无法在模拟信号和数字信号之间建立有效的比值差和相位差量值溯源的桥梁，因此，微差源的原理并不适用于电子式互感器整检装置。

3. 基于脉冲时间偏移的相位差校准方法

对于电子式互感器校验仪和合并单元测试仪而言，其基本工作原理是将模拟信号转换成数字信号，而在频率稳定的情况下，信号采样的时刻决定了采样值的相位偏差。因此，电子式互感器校验仪和合并单元测试仪的相位差准确度可转化为时间量值来进行校准。

3.1. 同步脉冲时移原理

在信号频率稳定的情况下，可利用同步脉冲的时间偏移，来实现对电子式互感器校验仪和合并单元测试仪相位差准确度的检测，具体原理如图 2 所示。图中红色圆点构成的正弦波形是整检装置输出的数字信号中数据解析得到的数据序列所描绘的波形 S_0 ，蓝色实线构成的正弦波形是整检装置输出的模拟信号 S_1 ，而脉冲波则是整检装置输出的同步信号 S_{sync} 。数字信号和模拟信号不存在相位差，即过零点时刻 t_0 是重合的。若同步信号的触发跳变沿与 t_0 也是重合的，则被校准的测试仪在解析数字信号的同时也开始进行模拟信号采样，即数字信号和模拟信号之间不存在相位差。

若将同步脉冲的时刻偏移一个特定的时间间隔 Δt ，则被校准的测试仪应在过零点附近的 $t_0 + \Delta t$ 时刻才开始进行模拟信号采样，如果 Δt 为正，则采样时刻在 t_0 之后，反之，则在 t_0 之前，从而实现了模拟信号和数字信号之间的相位差。

3.2. 相位差计算分析

在图 2 中，若设定过零时刻 t_0 为参考时间点，则模拟信号和数字信号所构成的向量的相位角均为 0° ，那么，数字信号 S_0 和模拟信号 S_1 可用公式(1)的形式表示。鉴于本文不考虑比值差的校准，故设定两个向量的幅度大小相等，均为 A 。

$$S_0 = S_1 = A \angle 0^\circ \quad (1)$$

而被测校验仪对模拟信号的采样值序列 S'_1 与模拟信号 S_1 相比，则相差一个相位角 φ ，可用公式(2)表示。

$$S'_1 = A \angle \varphi \quad (2)$$

而相位角 φ 的理论值可根据公式(3)计算，其中 $freq$ 为电网的基本频率 50 Hz。整检装置可将预设的相位角数值 φ 换算成时间偏移 Δt 即可实现数字信号和模拟信号之间的各预设的相位差。

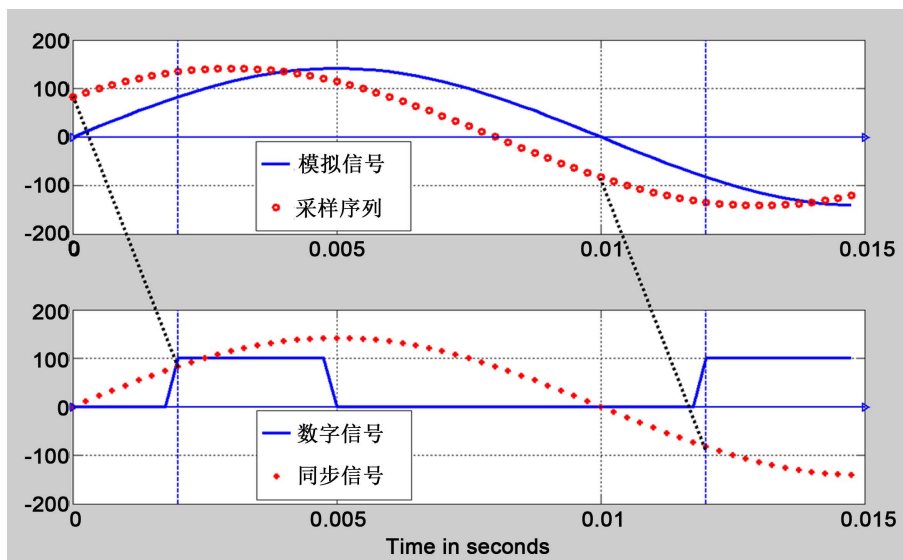


Figure 2. Calibration mechanism of time-shift method of synchronize signal
图 2. 同步脉冲的时间偏移方法工作原理

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot \Delta t \tag{3}$$

若测试仪实际测得的相位角为 φ' ，那么校验仪的所测相位差的误差 $\Delta\varphi$ 可用公式(4)表示。

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = \varphi' - 2\pi \cdot \text{freq} \cdot \Delta t \tag{4}$$

这里相位差的误差不再是通过测量信号差值来实现，而是通过对时间的测量来实现。时间值可以量值溯源到更高等级的时间标准。

4. 整检装置相位准确度的量值溯源

在校准电子式互感器校验仪和合并单元测试仪时，预设的相位差 φ 是作为标准值来使用的，因此，需要确保其准确性来保证相位准确度量值溯源体系的完整性。

4.1. 相位准确度量值溯源原理

根据本文 2.2 节中的阐述，在频率稳定的情况下，相位角最终可转换为时间偏移量。对于整检装置而言，其预设的相位差值可通过模拟信号输出的过零点时刻 t_0 为与同步信号的触发跳变沿所在时刻之间的时间差 Δt 来实现，根据时间差 Δt 的准确度即可换算出预设相位差 φ 的准确度。因此，对于整检装置相位准确度的校准可按照图 3 所描述的方法进行。该方法需用到的设备包括双通道高准确度的时间测量装置[8]，例如时频分析仪以及过零检测装置、光电转换装置等。

为了准确的测量实际的时间差 Δt_a ，将校准整检装置的模拟信号输入过零检测装置，将同步信号输入光电转换装置，并将过零检测装置和光电转换装置的输出信号分别接入高准确度时频分析仪的输入通道，即可通过该设备测得两个信号脉冲的时间差，其原理如图 4 所示。

其中，跳变沿所处时刻为 t_0 的脉冲为过零检测装置的输出脉冲，指示模拟信号过零点时刻。跳变沿所处时刻为 t_1 的脉冲为光电转换器的输出脉冲，指示光同步信号的实际跳变时刻。故高准确度时频分析仪测量得到实际的时间偏移 Δt_a 可用公式(5)表示。

$$\Delta t_a = t_1 - t_0 \tag{5}$$

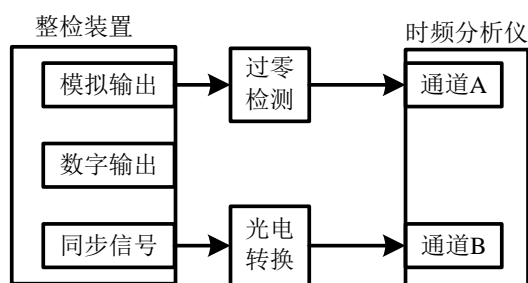


Figure 3. Diagram for phase accuracy calibration of EIT tester calibrator
图 3. 整检装置相位准确度校准接线图

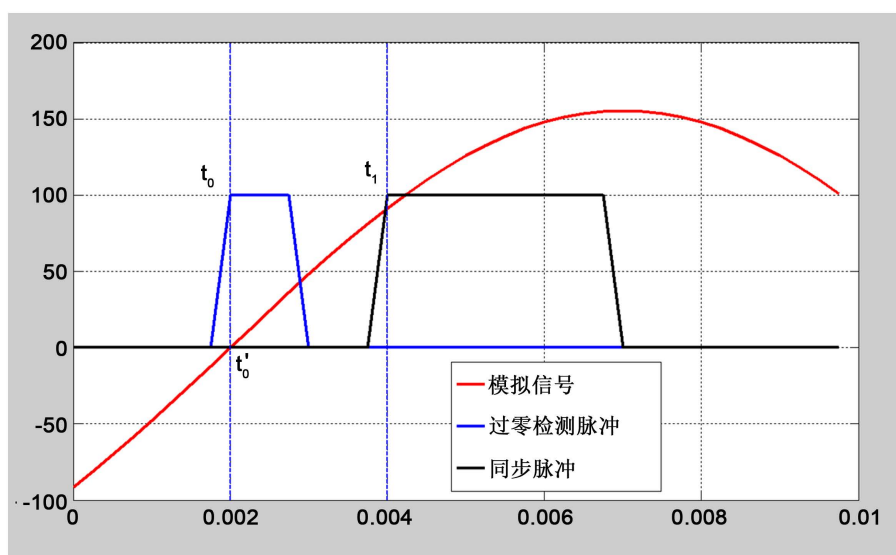


Figure 4. Calibration theory for phase accuracy of EIT tester calibrator
图 4. 相位准确度校准原理

整检装置的时间偏移误差 $\Delta\delta_c$ 及相位误差 Δt_c 可用公式(6)表示。

$$\Delta t_c = \Delta t - \Delta t_a = \Delta t - t_1 + t_0; \quad \Delta\delta_c = 2\pi \cdot \text{freq} \cdot \Delta t_c = 2\pi \cdot \text{freq} \cdot (\Delta t - t_1 + t_0) \quad (6)$$

4.2. 不确定度分析

鉴于相位的测量最终转换为对时间的测量，因此，可使用时间不确定度的分析结果来推算相位不确定度的结果，其数学模型及传播率可用公式(7)和公式(8)表示，其中 t_x 和 t_p 分别是预设时间值和时频分析仪读取的实际时间值[9]。

$$t_x = t_p \quad (7)$$

$$\partial t_x / \partial t_p = 1 \quad (8)$$

对测量结果产生影响的因素及计算结果如表 1 所示，主要包括测量重复性 u_1 、时频分析仪频率误差 u_2 、光电转换器时延误差 u_3 、过零检测误差 u_4 、整检装置的分辨率 u_5 、以及测量回路影响 u_6 等。其中， k 表示分布系数， γ 表示自由度， c 表示传播率。

由于所有影响因子之间均无相互影响，因此，时间测量的合成不确定度及自由度可根据公式(9)和公式(10)计算。

Table 1. Calculation of the measurement uncertainty**表 1.** 测量不确定度的分析计算

影响因子	k	γ	c	u (单位为 s)
u_1	/	9	/	5.10E-07
u_2	1.732	50	1	2.88E-07
u_3	1.732	50	1	5.77E-08
u_4	1.732	50	1	2.88E-06
u_5	1.732	50	1	2.88E-07
u_6	1.732	5	1	2.88E-07

$$u_c = \sqrt{\sum_1^n u_i} = 2.9 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (9)$$

$$\gamma_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_1^N \frac{u_i^4}{\gamma_i}} = 56 \quad (10)$$

设定包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度 U_{95} 可根据公式(11)计算。而将时间的不确定度换算到相位角则根据公式(12)计算。

$$U_{95} = u_c \times k = 5.8 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (11)$$

$$U_{95\text{-phase}} = 2\pi \cdot \text{freq} \cdot U_{95} = 0.018 \text{ rad} = 6.26' \quad (12)$$

5. 试验及算例

根据上述原理，我们研制了电子式互感器校验仪整检装置，使用脉冲时间偏移的方法对现有的电子式互感器校验仪进行了检测，并对整检装置的相位准确度进行了测量试验。

将整检装置预先设置的相位差为 $15'$ ，即 0.25° ，通过时频分析仪测得的过零时间和脉冲时间间隔为 13.52 us ，因此该整检装置在 $15'$ 测点的相位误差可根据公式(13)计算。

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= 0.25^\circ - 12.52 \times 10^{-6} \times 360^\circ \times 50 \text{ Hz} \\ \Delta\delta &= 0.02464^\circ = 1.48' \end{aligned} \quad (13)$$

6. 总结

本文针对电子式互感器校验仪及合并单元测试仪的相位准确度无法进行量值溯源的情况，为电子式互感器校验仪整检装置提出了一种基于同步脉冲时间偏移的相位准确度检测方法，该方法能有效对电子式互感器校验仪、合并单元测试仪等各类电子检测设备的相位准确度进行检测，并可溯源到时间标准，在数字信号和模拟信号之间建立了联系，实现了量值溯源体系的完整性。

参考文献 (References)

- [1] 张秋雁, 李鹏程, 肖监, 等. 电子式互感器数字输出校验系统的研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(1): 45-48.
- [2] 谭洪恩, 胡浩亮, 雷民, 章述汉, 李前, 李鹤, 李登云. 电子式互感器现场校准技术实验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2990-2995.
- [3] 杨慧霞, 郭伟, 邓迎君. 几种电子式互感器校验方式的研究和比较[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 99-101.

-
- [4] 陈福胜, 欧朝龙, 万全, 李恺. 电子式互感器校验仪的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2011(1): 55-58.
- [5] 金翼, 李方, 李晓. 基于误差分步测量的电子式互感器及合并单元校验系统的研究与实现[J]. 电测与仪表, 2013(2): 45-49.
- [6] 申妍华, 潘峰. 一种传统互感器和电子式互感器的校验方法[J]. 电测与仪表, 2013(11): 14-17.
- [7] 王乐仁. 电力互感器检定及应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [8] 郜洪亮, 刘遵义. 基于 GPS 和 FPGA 的便携式高精度同步时钟的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 80-82.
- [9] JJF-1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S].

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org